

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЛИСТОВЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ ТИТАНА, ЛЕГИРОВАННОГО РЗМ

© 2018 г. С.В. Скворцова, И.А. Грушин, К.А. Сперанский, Е.В. Кавченко

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ (НИУ))

Статья поступила в редакцию 02.03.17 г., доработана 22.08.17 г., подписана в печать 11.10.17 г.

Продолжены исследования, посвященные изучению влияния микролегирования редкоземельным металлом гадолинием на формирование структуры и свойства титанового сплава при термическом воздействии. Как установлено ранее, введение в опытный жаропрочный сплав гадолиния способствует преобразованию структуры в литом состоянии, приводит к уменьшению размера структурных составляющих, а также воздействует на скорости роста и зарождения частиц. Выявлено, что дополнительное легирование гадолинием не оказывает существенного влияния на формирование микроструктуры горячекатаных листов из жаропрочного опытного сплава после отжига при температуре 950 °С. Структура представлена равноосными частицами первичной α -фазы, вторичной α -фазы пластинчатой морфологии и небольшим количеством β -фазы. Определено, что в процессе изотермической выдержки ($t = 700$ °С, $\tau = 100$ ч) в частицах первичной α -фазы протекают процессы упорядочения и отмечается выделение частиц α_2 -фазы, а на межфазной α/β -границе – образование химических соединений в виде силицидов. Показано, что формирование α_2 -фазы происходит в теле частиц первичной α -фазы, а приграничные ее области свободны от выделений, что обусловлено обеднением алюминием вследствие протекания $\beta \rightarrow \alpha$ -превращения. Установлено, что с увеличением в сплаве содержания гадолиния размеры выделяющихся частиц силицида уменьшаются. Если в сплаве с 0 % Gd средний размер частиц составляет 0,2–0,3 мкм, то в сплаве с 0,2 % Gd он снижается до 0,05–0,1 мкм. Показано, что введение в жаропрочный титановый сплав 0,2 % Gd приводит к уменьшению глубины «альфированного» слоя, повышению на 30 % циклической долговечности и кратковременной прочности при температуре 700 °С.

Ключевые слова: жаропрочный титановый сплав, фазовый состав, структура, свойства, микролегирование, редкоземельный металл (РЗМ), гадолиний, механические свойства, малоцикловая усталость, кратковременная прочность, термическая обработка, отжиг, изотермическая выдержка.

Скворцова С.В. – докт. техн. наук, профессор кафедры «Материаловедение и технология обработки материалов» (МиТОМ) МАИ (НИУ) (125993, г. Москва, Волоколамское ш., 4). E-mail: skvorcovasv@mat.i.ru.

Грушин И.А. – ст. преподаватель, инженер кафедры «МиТОМ», МАИ (НИУ). E-mail: grushin_ivan@bk.ru.

Сперанский К.А. – инженер кафедры «МиТОМ», МАИ (НИУ). E-mail: speranski.konstantin@mail.ru.

Кавченко Е.В. – аспирант кафедры «МиТОМ», МАИ (НИУ). E-mail: mitom@implants.ru.

Для цитирования: Скворцова С.В., Грушин И.А., Сперанский К.А., Кавченко Е.В. Влияние термической обработки на структуру и свойства листовых полуфабрикатов из жаропрочного сплава на основе титана, легированного РЗМ // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2018. No. 1. С. 22–29. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2018-1-22-29.

Skvortsova S.V., Grushin I.A., Speranskiy K.A., Kavchenko E.V.

Effect of heat treatment on structure and properties of sheet semi-finished product made of heat-resistant alloy based on titanium and doped with rare-earth metal

This paper is a continuation of studies on the effect of microalloying with gadolinium, a rare earth metal, on the structure formation and properties of a titanium alloy under thermal action. It was previously shown that the introduction of gadolinium into an experimental heat-resistant alloy promotes cast structure transformation and reduces the size of structural components, and affects the rate of growth and nucleation of particles. It has been established that additional alloying of gadolinium has no significant influence on the microstructure formation of hot-rolled sheets made of the heat-resistant experimental alloy after annealing at 950 °С. The structure is represented by equiaxial particles of the primary α -phase, secondary α -phase of lamellar morphology and a small amount of β -phase. It has been established that the ordering processes occur in primary α -phase particles and α_2 -phase particles are formed during isothermal aging at 700 °С for 100 h with the formation of silicides at the α - β interface. It is shown that the α_2 phase is formed in the body of the primary α -phase particles, and its border regions are free from precipitations that is due to their aluminum depletion as a result of $\beta \rightarrow \alpha$ transformation. It has been established that the silicide particle size is reduced as the gadolinium content in the alloy

increases. The average particle size is 0,2–0,3 μm in the alloy with 0 % Gd, and it is reduced to 0,05–0,1 μm in the alloy with 0,2 % Gd. It was shown that the introduction of 0,2 % of gadolinium into the heat-resistant titanium alloy leads to a decrease in the gas-saturated layer depth, and to an increase in the cyclic durability and short-term strength at 700 °C by 30 %.

Keywords: heat-resistant titanium alloy, phase composition, structure, properties, microalloying, rare-earth metal (REM), gadolinium, mechanical properties, low cycle fatigue, short-term strength, heat treatment, annealing, isothermal ageing.

Skvortsova S.V. – Dr. Sci. (Tech.), prof., Department «Material science and materials treatment technology», Moscow Aviation Institute (National Research University) (MAI (NRU)) (125993, Russia, Moscow, Volokolamskoe shosse, 4).
E-mail: skvorcovasv@mati.ru.

Grushin I.A. – senior teacher, engineer, Department «Material science and materials treatment technology», MAI (NRU).
E-mail: grushin_ivan@bk.ru.

Speranskiy K.A. – engineer, Department «Material science and materials treatment technology», MAI (NRU).
E-mail: speranski.konstantin@mail.ru.

Kavchenko E.V. – postgraduate student, Department «Material science and materials treatment technology», MAI (NRU).
E-mail: mitom@implants.ru.

Citation: Skvortsova S.V., Grushin I.A., Speranskiy K.A., Kavchenko E.V. Vliyaniye termicheskoi obrabotki na strukturu i svoystva listovyykh polufabrikatov iz zharoprochnogo splava na osnove titana, legirovannogo RZM. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2018. No. 1. P. 22–29. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2018-1-22-29.

Введение

Развитие науки и техники постоянно предъявляет новые требования к материалам, которые должны отвечать современным тенденциям совершенствования летательных аппаратов [1–5]. Существует несколько путей решения поставленной задачи. Одним из них, с точки зрения оптимального соотношения экономического и технологического обоснований, является модернизация существующих сплавов путем легирования их новыми элементами в небольшом количестве (микролегирование) [4–9]. Это позволяет существенно изменять характеристики материала при незначительном изменении существующего технологического процесса [3–11].

Ожидаемые результаты микролегирования могут быть достигнуты применением химических элементов с уникальным сочетанием физико-химических свойств, к которым относятся, например, лантаниды, или, как их называют, редкоземельные металлы (РЗМ). Интерес к использованию РЗМ в металлургии в первую очередь связан с их способностью воздействовать на структуру и свойства сплавов при микролегировании [7–24]. Поэтому задача по изучению влияния микролегирования редкоземельными металлами на комплекс свойств промышленных титановых сплавов и изменение их структуры несомненно является актуальной.

Ранее было показано [10], что введение в опытный жаропрочный сплав гадолиния способствует преобразованию структуры в литом состоянии. С увеличением содержания Gd в сплаве происхо-

дит постепенное изменение морфологии частиц α -фазы от крупнопластинчатых, расположенных по границам и в теле исходного β -зерна, до мелкопластинчатых с формированием так называемой видманштеттовой структуры. Выявлено, что повышение содержания гадолиния в сплаве при последующих деформационном и термическом воздействиях приводит к уменьшению количества первичной α -фазы в структуре, ее незначительному укрупнению и, соответственно, росту количества вторичной α -фазы, образующейся из β -фазы в процессе охлаждения от температуры обработки до комнатной температуры.

Было установлено, что дополнительное легирование гадолинием влияет на соотношение скоростей роста и зарождения частиц α -фазы в процессе охлаждения.

Данная работа является продолжением исследований по изучению влияния гадолиния на формирование структуры и свойства опытного жаропрочного титанового сплава при различных режимах обработки.

Материалы и методика экспериментов

Объектами исследования служили листовые полуфабрикаты опытных сплавов с различным содержанием гадолиния, полученных по опытной технологии. Химический состав сплавов показан в табл. 1.

Исследования проводили с применением оптического микроскопа «Zeiss Axio-Observer A-1» (Carl

Таблица 1

Химический состав опытных сплавов, мас. %

Состав сплава	Al	Mo	Zr	Sn	Fe	Si	Nb	Gd	C	N	O
1	6,49	0,67	3,99	2,39	0,046	0,188	0,95	—	≤0,01	≤0,01	0,026
2	6,45	0,68	3,92	2,47	0,047	0,17	0,96	0,045	≤0,01	≤0,01	0,025
3	6,71	0,70	3,89	2,50	0,048	0,17	0,99	0,185	≤0,01	≤0,01	0,025

Zeiss, Германия) и просвечивающего электронного микроскопа JEM 200CX (JEM, Япония) при ускоряющем напряжении 160 кВ с разрешением 5 Å. Для изучения структуры использовались дифракционные методы получения изображений в режиме темного и светлого полей. Кристаллографическую ориентацию участков структуры определяли при совместном анализе микроизображений и дифракционных картин. Образцы готовили методом электролитического утонения (струйная полировка) в кислотно-спиртовом электролите.

Глубину альфированного слоя оценивали методом косых шлифов на микротвердомере «Micro-met 5101» (Buehler, Германия) с помощью цифровой системы получения и анализа изображений «ImageExpert MicroHardness 2» в соответствии с ПИ 1. 2.665-2003 [25]. Обработку результатов измерений проводили в автоматическом режиме с учетом статистических данных методом наименьших квадратов при аппроксимации экспериментальной кривой полиномом второй степени. Рентгеноструктурный фазовый анализ выполняли в фильтрованном излучении CuK_α на дифрактометрах ДРОН-4 и ДРОН-7 (НПП «Буревестник», г. Санкт-Петербург).

Механические испытания на малоцикловую усталость осуществляли на установке «Zwick/Roell Amsler 100 HFP 5100» (Zwick/Roell, Германия) со знакопостоянной нагрузкой при $\sigma_{\text{max}}^{\text{нст}} = 200$ МПа, частоте $f = 50$ Гц, коэффициенте асимметрии $R_\sigma = 0,1$ и температуре испытаний $t = 20$ °С.

Испытания на растяжения проводили на установке UTS 111.2-50-23 (ОАО «Тестсистемы», г. Иваново) с высокотемпературной камерой STI TC 2/1200 (ОАО «Тестсистемы») при $t = 700$ °С в соответствии со стандартом ASTM E21-09.

Результаты и их обсуждение

Исследовалось влияние термической обработки на формирование структуры и свойств листовых полуфабрикатов из опытного жаропрочного

титанового сплава с различным содержанием гадолиния. Жаропрочные сплавы должны работать при повышенных температурах длительное время без изменения своих характеристик. Для сравнительного анализа влияния структуры на свойства сплавов был выбран стандартный режим термической обработки для жаропрочных псевдо- α -сплавов, при котором нагрев осуществляли до температур на 50–100 °С ниже температуры полиморфного превращения ($t_{\text{пп}}$) с последующим охлаждением на воздухе [26]. Как показали ранее проведенные исследования [10], введение в сплав гадолиния повышает величину $t_{\text{пп}}$. Однако для отжига была выбрана единая температура 950 °С, которая для сплава без гадолиния находится ниже $t_{\text{пп}}$ на 50 °С, а для сплава с 0,2 % Gd — на 90 °С.

Полученные результаты показали, что дополнительное легирование гадолинием не оказывает существенного влияния на структуру жаропрочного опытного сплава (рис. 1). После отжига при $t = 950$ °С микроструктура сплавов представлена равноосными зернами α -фазы, которые формируются в процессе изотермической выдержки в результате протекания рекристаллизационных процессов в деформированных листовых полуфабрикатах (см. рис. 1). Помимо α -фазы в структуре присутствует и небольшое количество β -фазы, расположенной по границам α -частиц.

Проведенный рентгеноструктурный анализ не выявил наличия каких-либо дополнительных фаз кроме α и β . При этом на микродифракционных картинах были обнаружены очень слабые сверхструктурные максимумы (см. рис. 1), свидетельствующие о протекании начальных этапов процесса упорядочения в отдельных микрообъемах α -фазы. Однако обнаружить частицы α_2 -фазы в сверхструктурных максимумах не удалось.

После отжига образцы с разным содержанием гадолиния подвергали изотермической выдержке при $t = 700$ °С в течение 100 ч и изучали формирование структуры и свойства. Принципиальных различий в их структуре выявлено не было

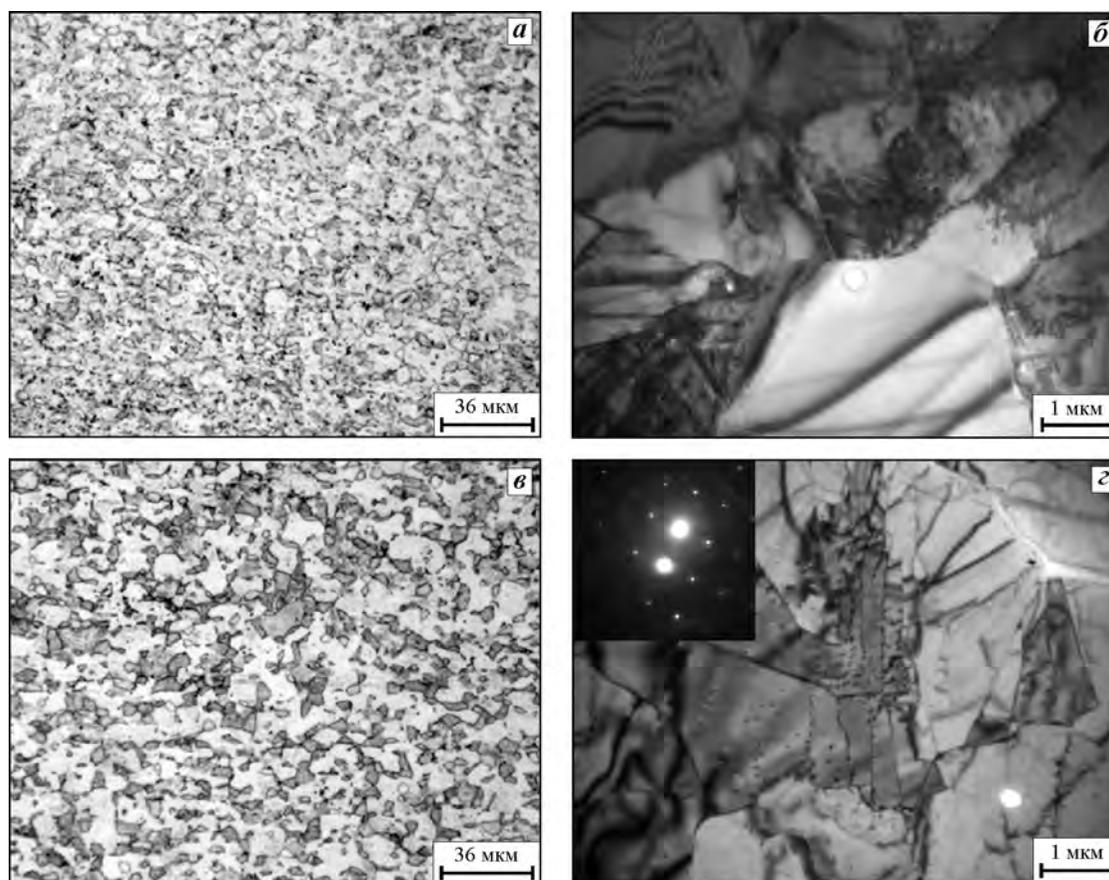


Рис. 1. Структура опытных жаропрочных сплавов Ti–6,5Al–4Zr–2,4Sn–Nb–0,7Mo–0,05Fe–0,2Si после отжига при $t = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$
a, б – 0 % Gd; *в, г* – 0,2 % Gd

(рис. 2). При охлаждении на воздухе с температуры $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ не успевают развиваться диффузионные процессы и в структуре фиксируется повышенное количество метастабильной β -фазы, которая претерпевает распад в процессе изотермической обработки. О протекании данного процесса можно судить по повышенной травимости участков, расположенных между частицами первичной α -фазы (см. рис. 2), и уменьшению периода решетки β -фазы с 0,3264 до 0,3253 нм, что свидетельствует о ее обогащении β -стабилизаторами.

В процессе изотермической выдержки в частицах первичной α -фазы происходит выделение α_2 -частиц, что определяется присутствием на дифракционных картинах сверхструктурных рефлексов. Частицы α_2 -фазы неравномерно распределены внутри частиц α -фазы — вблизи границ наблюдаются области протяженностью до 200 нм, свободные от выделений. Это обусловлено тем, что в процессе охлаждения на воздухе после отжига при $t = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ полностью не успевают

произойти все диффузионные процессы, что приводит к формированию метастабильной структуры с повышенным, по сравнению с равновесным состоянием, количеством β -фазы. Ее количество в процессе изотермической выдержки при $t = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ уменьшается до равновесного состояния за счет выделения α -фазы. Причем преимущественно этот процесс будет протекать не за счет образования новых частиц α -фазы, а вследствие роста уже существующих, и контролироваться, в первую очередь, диффузией вблизи межфазной границы. Так как алюминий является α -стабилизатором, то он имеет большую растворимость в α -фазе по сравнению с β . Увеличение размера частиц α -фазы за счет $\beta \rightarrow \alpha$ -превращения приводит к тому, что вблизи границ α -фаза будет обеднена алюминием, так как образуется из β -фазы, содержащей меньшее его количество. Этим, по-видимому, обусловлено то, что вблизи границ α -частиц не происходит формирования α_2 -фазы (см. рис. 2).

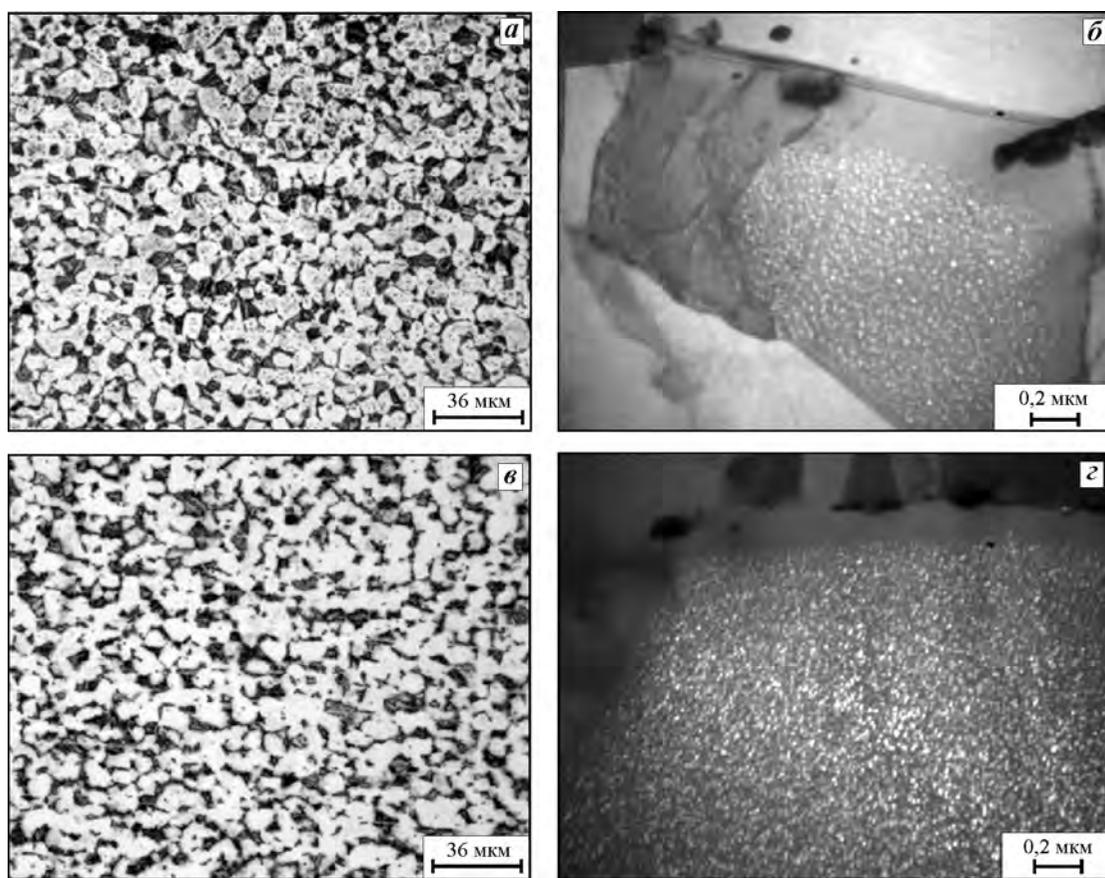


Рис. 2. Структура опытных жаропрочных сплавов после 100 часовой изотермической выдержки при $t = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$

a, в – оптическая металлография; *б, г* – темнопольное изображение структуры в рефлексе α_2 -фазы
a, б – 0 % Gd; *в, г* – 0,2 % Gd

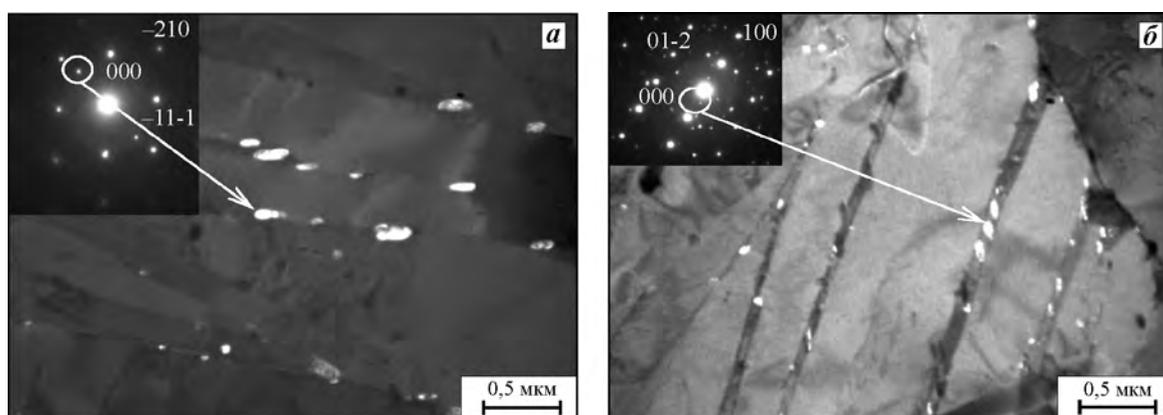


Рис. 3. Темнопольное изображение структуры в рефлексе Ti_5Si_3 после 100-часовой изотермической выдержки опытных сплавов при $t = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$

a – 0 % Gd; *б* – 0,2 % Gd

В составе исследуемых жаропрочных сплавов присутствует кремний в количестве 0,17–0,18 %. Это содержание превышает его предельную растворимость в α -фазе (0,08 %), что приводит к вы-

делению силицидов на межфазных границах в процессе изотермической выдержки при $t = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 3). Было обнаружено, что с увеличением в сплаве количества гадолиния происходит умень-

шение размера выделяющегося силицида. Если в сплаве с 0 % Gd средний размер частиц силицида соответствует 0,2–0,3 мкм, то в сплаве с 0,2 % Gd он равен 0,05–0,1 мкм.

Сплав, предназначенный для работы при повышенных температурах, должен обладать повышенной жаростойкостью, т.е. стойкостью к окислению. В процессе работы происходит не только образование оксида на поверхности, но и диффузия кислорода в глубь металла с образованием так называемого альфированного слоя. Диффундируя в кристаллическую решетку α -титана, кислород образует твердый раствор внедрения, что приводит к резкому увеличению твердости вблизи поверхности. С удалением от поверхности содержание кислорода будет снижаться, соответственно, будет уменьшаться и твердость. Сравнительный анализ протяженности альфированного слоя, определяемого методом «косых шлифов», позволяет оценить стойкость материала к окислению: чем меньше протяженность этого слоя при прочих равных условиях, тем выше стойкость материала к окислению.

Поэтому на следующем этапе работы было изучено влияние содержания гадолиния на глубину альфированного слоя после 100-часовой изотермической выдержки при $t = 700$ °С. Проведенные исследования показали, что введение в сплав 0,05 % Gd практически не сказывается на глубине альфированного слоя, которая составила 100–110 мкм (рис. 4, а, б). Дополнительное введение в сплав 0,2 % Gd уменьшает ее величину до 70–80 мкм (рис. 4, в).

Таким образом, введение в жаропрочный титановый сплав 0,2 % гадолиния снижает на 30 % протяженность альфированного слоя при повышенных температурах.

Испытания на кратковременную прочность при температуре 700 °С образцов, отожженных при $t = 950$ °С, показали, что увеличение содержания гадолиния в опытном сплаве позволяет в 1,3 раза повысить значение предела прочности. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

На следующем этапе работы было исследовано влияние гадолиния на малоцикловую усталость при комнатной температуре. Предварительно образцы были отожжены при температуре 950 °С в течение 1 ч с последующим охлаждением на воздухе, а затем подвергнуты изотермической выдержке при $t = 700$ °С длительностью 100 ч. Проведенные испытания показали, что введение в сплав гадоли-

Таблица 2
Результаты испытаний на кратковременную прочность (при $t = 700$ °С) и циклическую долговечность* опытного титанового сплава Ti–6,5Al–4Zr–2,4Sn–1,0Nb–0,7Mo–0,2Si с различным содержанием гадолиния

Gd, мас.%	σ_B , МПа	N, циклы
0	310	48100
0,05	370	56833
0,2	400	72236

* $\sigma = 207$ МПа, $f = 49$ Гц, $R_G = 0,1$, $t = 20$ °С.

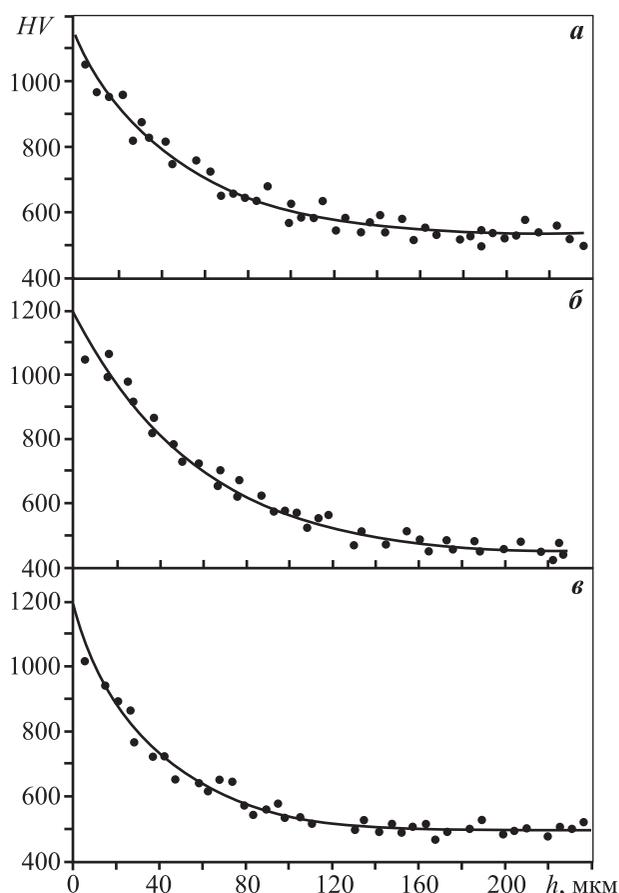


Рис. 4. Распределение микротвердости по глубине образцов опытных сплавов после изотермического отжига ($t = 700$ °С, $\tau = 100$ ч) Gd, мас. %: а – 0, б – 0,05, в – 0,2

ния приводит к увеличению циклической долговечности на 30 % (см. табл. 2).

Закключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что дополнительное легирование жаропрочного сплава 0,2 % гадолиния позволяет на 30 %

уменьшить глубину альфированного слоя сплава, повысить циклическую долговечность после изотермической выдержки при 700 °С в течение 100 ч и кратковременную прочность при 700 °С.

Литература

1. *Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Линецкий Я.Л.* Физические свойства металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1980.
2. *Siemers C., Brunke F., Laukart J., Hussain M.S., Rösler J., Saksl K., Zahra B.* Rare earth metals in titanium alloys — a systematic study // *Rare Earths*. 2012. Vol. 1. P. 281—292.
3. *Holm M., Ebel T., Dahms M.* Investigations on Ti—6Al—4V with gadolinium addition fabricated by metal injection moulding // *Mater. Design*. 2013. Vol. 51. P. 943—948.
4. *Hadi M., Meratian M., Shafyei A.* The effect of lanthanum on the microstructure and high temperature mechanical properties of a beta-solidifying TiAl alloy // *J. Alloys Compd.* 2015. Vol. 618. P. 27—32.
5. *Улякова Н.М.* Влияние редкоземельных металлов на механические свойства и структуру жаропрочного титанового α -сплава // *Металловедение и терм. обраб. металлов*. 1994. No. 3. С. 3—9.
6. *Вест А.* Химия твердого тела. Теория и приложения. В 2 ч. Ч. 1 / Пер. с англ. М.: Мир, 1988.
7. *Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М.* и др. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.
8. *Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшин И.С.* Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: Справочник. М.: ВИЛС—МАТИ, 2009.
9. *Савицкий Е.М.* Редкоземельные металлы и перспективы их использования в промышленности // *Вестн. АН СССР*. 1960. No. 6. С. 81—89.
10. *Скворцова С.В., Грушин И.А., Сперанский К.А., Демамков А.А., Мамонова Н.А.* Влияние дополнительного легирования гадолинием на структуру и свойства опытного жаропрочного титанового сплава в литом и деформированном состояниях // *Титан*. 2017. No. 1. С. 4—9.
11. *Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В.* Редкие металлы и редкоземельные элементы — материалы современных и будущих высоких технологий // *Тр. ВИАМ*. 2013. No. 2. С. 3—10.
12. *Ночовная Н.А., Хорев А.И., Яковлев А.Л.* Перспективы легирования титановых сплавов РЗЭ // *Металловедение и терм. обраб. металлов*. 2013. No. 8 (698). С. 18—23.
13. *Song Lu, Qing-Miao Hu, Rui Yang, Börje Johansson, Levente Vitos.* Rare earth elements in α -Ti: A first-principles investigation // *Comput. Mater. Sci.* 2009. Vol. 46. Iss. 4. P. 1187—1191.
14. *Brunke F., Waalkes L., Siemers C.* Deformability of the rare-earth metal modified metastable-beta alloy Ti—15Mo // *Int. J. Chem., Mol., Nucl., Mater. Metall. Eng.* 2014. Vol. 8. No. 11. P. 1205—1209.
15. *Tedenac J.-C., Ivanov M.I., Bulanova M.V., Berezutski V.V.* Thermochemistry of binary liquid Gd—Ti and Tb—Ti alloys // *J. Alloys Compd.* 2005. Vol. 396. Iss. 1—2. P. L1—L3.
16. *Xia K., Li W., Liu C.* Effects of addition of rare earth element Gd on the lamellar grain sizes of a binary Ti—44Al alloy // *Scr. Mater.* 1999. Vol. 41. Iss. 1. P. 67—73.
17. *Nie J.F., Majumdar A., Muddle B.C.* Development of high temperature dispersion strengthening in rapidly quenched Al—Ti—X alloys // *Mater. Sci. Eng. A*. 1994. Vol. 179—180. Pt. 1. P. 619—624.
18. *Ночовная Н.А., Яковлев А.Л., Алексеев Е.Б.* Влияние гадолиния на жаропрочность сплава ВТ38 // *Технол. легких сплавов*. 2012. No. 1. С. 39—46.
19. *Улякова Н.М.* Влияние редкоземельных металлов на механические свойства и структуру жаропрочного титанового α -сплава // *Металловедение и терм. обраб. металлов*. 1994. No. 3. С. 30—31.
20. *Хорев А.И.* Фундаментальные исследования легирования титановых сплавов редкоземельными элементами // *Вестн. машиностроения*. 2011. No. 11. С. 53—62.
21. *Yong Liu, Lifang Chen, Weifeng Wei, Huiping Tang, Bin Liu, Baiyun Huang.* Improvement of ductility of powder metallurgy titanium alloys by addition of rare earth elements // *J. Mater. Sci. Technol.* 2006. Vol. 22. No. 4. P. 465—469.
22. *Hui-qun Liu, Dan-qing Yi, Wei-qi Wang, Li-ping Wang, Cai-hao Lian.* Influence of Sc on high temperature strengthening behavior of Ti—6Al—4V alloy // *Trans. Nonferr. Met. Soc. China*. 2007. Vol. 17. P. 1212—1219.
23. *Liu H.Q., Yi D.Q., Zheng F.* The influence of Sc and α/β transformation of Ti // *Mater. Sci. Eng.* 2008. Vol. A487. P. 58—63.
24. *Скворцова С.В., Грушин И.А., Мамонова Н.А., Сперанский К.А., Слезов С.С.* Фазовые и структурные превращения в сплавах системы Ti—6Al—Sc // *Титан*. 2016. No. 2 (52). С. 12—18.
25. Определение величины газонасыщенного (альфированного) слоя на полуфабрикатах и изделиях из титановых сплавов: Произв. инструкция ПИ 1.2.665-2003. М.: ВИАМ, 2003.
26. Термическая обработка полуфабрикатов и деталей из титановых сплавов: Произв. инструкция ПИ 1.2.587-02. М.: ВИАМ, 2002.

References

1. *Livshits B.G., Kraposhin V.S., Linetski Ya.L.* Fizicheskie svoistva metallov i splavov [Physical properties of metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1980.

2. *Siemers C., Brunke F., Laukart J., Hussain M.S., Rösler J., Saksal K., Zahra B.* Rare earth metals in titanium alloys — a systematic study. *Rare Earths*. 2012. Vol. 1. P. 281—292.
3. *Holm M., Ebel T., Dahms M.* Investigations on Ti—6Al—4V with gadolinium addition fabricated by metal injection moulding. *Mater. Design*. 2013. Vol. 51. P. 943—948.
4. *Hadi M., Meratian M., Shafyei A.* The effect of lanthanum on the microstructure and high temperature mechanical properties of a beta-solidifying TiAl alloy. *J. Alloys Compd.* 2015. Vol. 618. P. 27—32.
5. *Ulyakova N.M.* Vliyanie redkozemel'nykh metallov na mekhanicheskie svoystva i strukturu zharoprochnogo titanovogo α -splava [The influence of rare earth metals and the mechanical properties of the structure of α -titanium superalloy alloy]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 1994. No. 3. P. 3—9.
6. *Vest A.* Khimiya tverdogo tela. Teoriya i prilozheniya [Solid state chemistry. Theory and applications. Pt. 1]. Moscow: Mir, 1988.
7. *Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovskii A.M.* et al. Fizicheskie velichiny: Spravochnik. Pod red. I.S. Grigor'eva, E.Z. Meilikhova [Physical quantities: Handbook. Eds. I.S. Grigor'ev, E.Z. Meilikhov]. Moscow: Energoatomizdat, 1991.
8. *Ilyin A.A., Kolachev B.A., Pol'kin I.S.* Titanovye splavy. Sostav, struktura, svoystva: Spravochnik [Titanium alloys. The composition, structure and properties: Handbook]. Moscow: VILS—MATI. 2009.
9. *Savitskii E.M.* Redkozemel'nye metally i perspektivy ikh ispol'zovaniya v promyshlennosti [Rare-earth metals and the prospects for their use in industry]. *Vestnik AN SSSR*. 1960. No. 6. P. 81—89.
10. *Skvortsova S.V., Grushin I.A., Speranskii K.A., Demakov A.A., Mamontova N.A.* Vliyanie dopolnitel'nogo legirovaniya gadolinium na strukturu i svoystva opyt'nogo zharoprochnogo titanovogo splava v litom i deformirovannom sostoyaniyakh [Effect of additional doping gadolinium on the structure and properties of the experimental heat-resistant titanium alloy in the cast and deformed states]. *Titan*. 2017. No. 1. P. 4—9.
11. *Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V.* Redkie metally i redkozemel'nye elementy — materialy sovremennykh i budushchikh vysokikh tekhnologii [Rare metals and rare earth elements - materials of current and future high-tech]. *Trudy VIAM*. 2013. No. 2. P. 3—10.
12. *Nochovnaya N.A., Khorev A.I., Yakovlev A.L.* Perspektivy legirovaniya titanovykh splavov RZE [Prospects doping titanium alloys REE]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2013. No. 8 (698). P. 18—23.
13. *Song Lu, Qing-Miao Hu, Rui Yang, Börje Johansson, Levente Vitos.* Rare earth elements in α -Ti: A first-principles investigation. *Comput. Mater. Sci.* 2009. Vol. 46. Iss. 4. P. 1187—1191.
14. *Brunke F., Waalkes L., Siemers C.* Deformability of the rare-earth metal modified metastable-beta alloy Ti—15Mo. *Int. J. Chem., Mol., Nucl., Mater. Metall. Eng.* 2014. Vol. 8. No. 11. P. 1205—1209.
15. *Tedenac J.-C., Ivanov M.I., Bulanova M.V., Berezutski V.V.* Thermochemistry of binary liquid Gd—Ti and Tb—Ti alloys. *J. Alloys Compd.* 2005. Vol. 396. Iss. 1—2. P. L1—L3.
16. *Xia K., Li W., Liu C.* Effects of addition of rare earth element Gd on the lamellar grain sizes of a binary Ti—44Al alloy. *Scr. Mater.* 1999. Vol. 41. Iss. 1. P. 67—73.
17. *Nie J.F., Majumdar A., Muddle B.C.* Development of high temperature dispersion strengthening in rapidly quenched Al—Ti—X alloys. *Mater. Sci. Eng. A*. 1994. Vol. 179—180. Pt. 1. P. 619—624.
18. *Nochovnaya N.A., Yakovlev A.L., Alekseev E.B.* Vliyanie gadoliniya na zharoprochnost' splava VT38 [Effect of gadolinium on the heat resistance of VT38 alloy]. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2012. No. 1. P. 39—46.
19. *Ulyakova N.M.* Vliyanie redkozemel'nykh metallov na mekhanicheskie svoystva i strukturu zharoprochnogo titanovogo α -splava [The influence of rare earth metals and the mechanical properties of a refractory structure α -titanium alloy]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 1994. No. 3. P. 30—31.
20. *Khorev A.I.* Fundamental'nye issledovaniya legirovaniya titanovykh splavov redkozemel'nymi elementami [Fundamental studies of titanium alloys doped with rare earth elements]. *Vestnik mashinostroeniya*. 2011. No. 11. P. 53—62.
21. *Yong Liu, Lifang Chen, Weifeng Wei, Huiping Tang, Bin Liu, Baiyun Huang.* Improvement of ductility of powder metallurgy titanium alloys by addition of rare earth elements. *J. Mater. Sci. Technol.* 2006. Vol. 22. No. 4. P. 465—469.
22. *Hui-qun Liu, Dan-qing Yi, Wei-qi Wang, Li-ping Wang, Cai-hao Lian.* Influence of Sc on high temperature strengthening behavior of Ti—6Al—4V alloy. *Trans. Nonferr. Met. Soc. China*. 2007. Vol. 17. P. 1212—1219.
23. *Liu H.Q., Yi D.Q., Zheng F.* The influence of Sc and α/β transformation of Ti. *Mater. Sci. Eng.* 2008. Vol. A487. P. 58—63.
24. *Skvortsova S.V., Grushin I.A., Mamontova N.A., Speranskii K.A., Slezov S.S.* Fazovye i strukturnye prevrashcheniya v splavakh sistemy Ti—6Al—Sc [Phase and structural transformations in alloys of Ti-6Al-Sc system]. *Titan*. 2016. No. 2 (52). P. 12—18.
25. *Opredelenie velichiny gazonasyschennogo (alfirovannogo) sloya na polufabrikatakh i izdeliyakh iz titanovykh splavov: Proizvodstvennaya instruktsiya PI 1. 2.665-2003 [Determination of the value of gas-saturated (alfa) layer on semi-finished products and products of titanium alloys: Industrial instruction PI 1. 2.665-2003].* Moscow: VIAM, 2003.
26. *Termicheskaya obrabotka polufabrikatov i detalei iz titanovykh splavov: Proizvodstvennaya instruktsiya PI 1.2.587-02 [Heat treatment of semifinished products and details from titanium alloys: Industrial instruction PI 1.2.587-02].* Moscow: VIAM, 2002.